

文章编号:1007-9629(2021)03-0499-09

轻集料对超高性能混凝土工作和力学性能的影响

张高展^{1,2}, 王宇璇¹, 葛竞成¹, 杨 军^{1,2}, 魏 琦¹

(1. 安徽建筑大学 材料与化学工程学院, 安徽 合肥 230601;

2. 安徽省先进建筑材料重点实验室, 安徽 合肥 230022)

摘要: 基于颗粒最紧密堆积原理, 确定了超高性能混凝土的胶凝材料组成和轻集料颗粒级配, 优化得到了轻集料超高性能混凝土(LUHPC)的基准配合比. 研究了轻集料粒形、轻集料预吸水率和掺量对 LUHPC 工作性能和力学性能的影响规律, 并利用超景深三维数码显微镜、扫描电子显微镜等探究了轻集料对 LUHPC 性能的影响机理. 结果表明: 轻集料的粒形和预吸水率是影响 LUHPC 工作性能和力学性能的关键因素; 随着轻集料粒形由碎石形转变为球形, LUHPC 的工作性能和力学性能均显著优化; 随着轻集料预吸水率的增加, LUHPC 工作性能改善, 但抗压强度和劈裂抗拉强度均呈现先增加后降低趋势; 随着轻集料掺量的增加, LUHPC 工作性能和力学性能均先提升后降低; 轻集料主要通过增大颗粒球形度、改善轻集料-水泥石界面黏结性和预湿内养护来提升 LUHPC 的工作性能和力学性能.

关键词: 轻集料; 超高性能混凝土; 粒形; 预吸水率; 工作性能; 力学性能

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.03.008

Effect of Lightweight Aggregate on Workability and Mechanical Properties of Ultra-high Performance Concrete

ZHANG Gaozhan^{1,2}, WANG Yuxuan¹, GE Jingcheng¹, YANG Jun^{1,2}, WEI Qi¹

(1. School of Materials and Chemical Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;

2. Anhui Province Key Laboratory of Advanced Building Materials, Hefei 230022, China)

Abstract: Based on the particle dense packing theory, the composition of cementitious materials and particle gradation of lightweight aggregate in ultra-high performance concrete were determined. On this basis, the basic mix proportion of ultra-high performance concrete with lightweight aggregate(LUHPC) was optimized. The effects of particle shape, pre-absorption ratio and content of lightweight aggregate on the workability and mechanical properties of LUHPC were studied. Besides, the mechanism of the effect of lightweight aggregate on the properties of LUHPC was investigated by ultra-depth field 3D digital microscope and scanning electron microscope. The results show that particle shape and pre-absorption ratio are the key factors that determine the workability and mechanical properties of LUHPC. The workability and mechanical properties of LUHPC with spherical lightweight aggregate are superior to UHPC with crushed lightweight aggregate. With the increase of pre-absorption of lightweight aggregate, the workability of LUHPC is improved, but the compressive strength and splitting tensile strength of LUHPC increase first and then decrease. With the increase of lightweight aggregate content, the workability and mechanical properties of LUHPC are improved first and then reduced. In addition, lightweight aggregate mainly im-

收稿日期:2020-08-12; 修订日期:2020-09-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878003);安徽省高校自然科学研究重大项目(KJ2019ZD55);安徽省高校优秀青年人才支持计划重点项目(gxyqZD2019055);安徽建筑大学博士启动基金项目(2018QD30)

第一作者:张高展(1981—),男,河南商丘人,安徽建筑大学副教授,硕士生导师,博士. E-mail:gaozhanzhang@126.com

proves the workability and mechanical properties of LUHPC by improving the sphericity of aggregate, the adhesion between lightweight aggregate and cement matrix and by providing internal curing effect.

Key words: lightweight aggregate; ultra-high performance concrete; particle shape; pre-absorption ratio; workability; mechanical property

超高性能混凝土(UHPC)是一种基于最佳颗粒级配的典型水泥基复合材料,通常情况下其水胶比低于 0.25,抗压强度不低于 100 MPa,开裂后抗拉强度不低于 5 MPa^[1-3]. UHPC 一般可分为两大类,一类是在活性粉末材料、工程复合胶凝材料等 DSP(densified with small particles)材料中加入纤维和石英粉等;一类是在 DSP 材料中加入砂、碎石等粗细集料得到的超高强度 UHPC^[4]. 相比普通高性能混凝土,UHPC 不仅具有更高的强度,其耐久性能、延性和吸能性能也得到大幅提升^[2-3,5],在预制桥梁、海上平台、地下空间等土建工程中均显示出独特的优越性,是混凝土技术发展的主要方向^[6].

然而,UHPC 的设计原理决定了其存在收缩大、易开裂的问题. 国内外学者从膨胀剂^[7]、内养护材料^[8-10]、粗集料^[11]等角度开展了大量 UHPC 的减缩抗裂研究. 本课题组^[12-14]则利用高吸水率、中低强度轻集料对 UHPC 进行减缩抗裂研究,并取得了良好效果. 轻集料内部多孔,预湿后具有显著的内养护效应,尤其是在低水胶比的 UHPC 中效果更为显著,可明显改善 UHPC 的体积稳定性. 但轻集料孔隙率高、强度低的特点也势必显著影响 UHPC 的工作性能和力学性能,因此有必要探明轻集料颗粒特性的影响. 本文基于颗粒最紧密堆积原理来确定胶凝材料组成和轻集料颗粒级配,优化得出轻集料超高性能混凝土(LUHPC)的基准配合比,并研究轻集料的粒形、预吸水率和掺量对 LUHPC 工作性能和力学性能的影响规律及其机理.

1 试验

1.1 原材料

P·O 52.5 水泥;硅灰,其中的 SiO₂ 含量(质量分数,本文涉及的含量、需水量比、胶砂比等除特别说明外均为质量分数或质量比)为 96%,比表面积 21 500 m²/kg;粉煤灰微珠,需水量比 90%;上述胶凝材料的化学组成见表 1. 石英砂,表观密度 2 600 kg/m³;轻集料,800 级球形黏土陶粒,筒压强度 5.3 MPa,表观密度 1 350 kg/m³,粒径范围 0.15~4.75 mm,饱和预湿时的吸水率 17.6%,碎石形陶粒由其破碎筛分而来;镀铜钢纤维,φ0.22×13 mm,抗拉强度 2 850 MPa;聚羧酸减水剂,减水率 30%.

表 1 胶凝材料化学组成
Table 1 Chemical composition of cementitious materials $w/\%$

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃	IL
Cement	21.10	6.16	4.41	64.80	1.94	0.48	2.52	2.59
Silica fume	96.00	1.00	0.70	0.50	0.70	0.08	0.15	3.70
Fly ash	52.00	22.00	4.00	12.00	0.56	0.43	0.35	1.00

1.2 LUHPC 配合比设计与制备

1.2.1 配合比设计

基于 Aim-Goff 三元体系模型^[15-17]并经试验验证,确定 UHPC 胶凝材料组成为: $m(\text{水泥}):m(\text{硅灰}):m(\text{粉煤灰})=1.00:0.26:0.12$;基于文献[18-19]关于集料与钢纤维相互关系理论,确定轻集料最大粒径为 2 mm;采用修正 Andreasen&Andersen 法计算轻集料颗粒级配^[20],其计算方法考虑了最大和最小粒径的级配,表达式见式(1):

$$p'(d)=\frac{d^q-d_{\min}^q}{d_{\max}^q-d_{\min}^q} \quad (1)$$

式中: $p'(d)$ 为粒径小于 d 的集料累计质量分数; $d_{\min}$ 、 $d_{\max}$ 分别为集料最小粒径和最大粒径; q 为分布模量,取值为 0.23.

试验用轻集料粒径范围为 0.15~2.00 mm,则 $d_{\min}$ 为 0.15 mm, $d_{\max}$ 为 2.00 mm. 依据式(1)计算得轻集料颗粒级配(见表 2),最终确定轻集料的颗粒级配为 5 个等级,具体为 0.15~0.18 mm、0.18~0.25 mm、0.25~0.425 mm、0.425~0.85 mm、0.85~2.00 mm,质量比为 0.05:0.10:0.18:0.27:0.40.

表 2 轻集料颗粒级配
Table 2 Particle gradation of lightweight aggregates

Particle size/mm	2.00	0.85	0.425	0.25	0.18	0.15
$p'(d)$	1.00	0.60	0.33	0.15	0.05	0

基于上述胶凝材料组成和轻集料颗粒级配,通过调控钢纤维掺量(体积分数)、胶砂比和外加剂适应性,确定了 LUHPC 的基准配合比,见表 3.

表 3 LUHPC 基准配合比
Table 3 Basic mix proportion of LUHPC

Mix proportion/(kg·m ⁻³)					Super-plasticizer	Steel
					(by mass)/%	fiber(by volume)/%
Cement	Silica fume	Fly ash	Lightweight aggregate	Water		
725	188	87	520	180	2.0	3.0

1.2.2 试件制备与养护

将陶粒装入网袋后放入水中预湿至需要程度,取出晾至面干,得到预湿陶粒.将按基准配合比称取的水泥、硅灰、粉煤灰微珠、1/3 量的钢纤维、预湿陶粒倒入混凝土搅拌机中干拌 1~3 min,待充分搅拌均匀后加入 80% 水和减水剂继续搅拌 3~6 min,获得均匀流动浆体;然后边搅拌边均匀撒入剩余 2/3 量的钢纤维、剩余的 20% 水和减水剂,搅拌 3~5 min 后装模成型;在成型试模表面覆盖保鲜膜后标准养护至规定龄期.力学性能试件均为 GB/T 31387—2015《活性粉末混凝土》中规定的标准试件.

1.3 试验方法

按照 GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》测试 LUHPC 拌和物的坍落度和扩展度;按照 GB/T 31387—2015 测试 LUHPC 的抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量;利用超景深三维数码显微镜表征 LUHPC 的界面区三维形态;利用扫描电子显微镜表征轻集料表面形貌和界面区二维形貌.

2 结果与讨论

2.1 轻集料对 LUHPC 拌和物工作性能的影响

2.1.1 轻集料粒形

轻集料粒形对 LUHPC 拌和物坍落度和扩展度的影响结果见表 4.

表 4 碎石形和球形陶粒 LUHPC 拌和物的工作性能

Table 4 Workability of LUHPC mixture with clastic ceramsite and spherical ceramsite

Particle shape	Slump/mm		Slump flow/mm	
	0 h	2 h	0 h	2 h
Clastic ceramsite	200	185	560	520
Spherical ceramsite	220	205	610	575

由表 4 可知,球形陶粒 LUHPC 初始和 2 h 的坍落度与扩展度均明显优于碎石形陶粒 LUHPC,而球形陶粒和碎石形陶粒 LUHPC 的 2 h 坍落度损失率分别为 6.8% 和 7.5%,2 h 扩展度损失率分别为 5.7% 和 7.1%,说明陶粒粒形对 LUHPC 拌和物的工作性能影响较明显.从 LUHPC 拌和物工作性能考虑,轻集料粒形宜为球形.王德辉^[21]、吴波等^[22]研究也发现,集料的球形度越大,混凝土的工作性能越好.

2.1.2 轻集料预吸水率

轻集料预吸水率对 LUHPC 拌和物坍落度和扩展度的影响见图 1.

由图 1 可见,随着陶粒预吸水率的增大,LUHPC 拌和物初始、2 h 的坍落度和扩展度均明显增大,但增幅逐步降低.此外,陶粒预吸水率越低,LUHPC 拌和物工作性能损失越大,利用预吸水率 10% 陶粒制备的 LUHPC 拌和物 2 h 坍落度和扩展度损失分别达 22% 和 10%.以上结果表明,轻集料

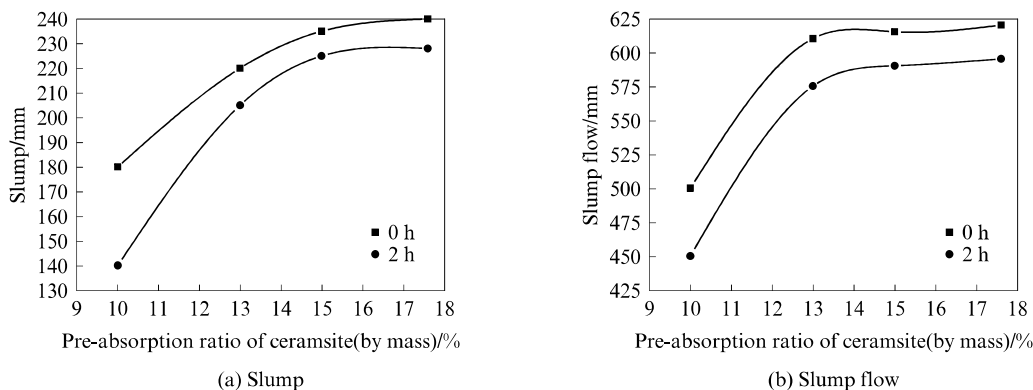


图 1 轻集料预吸水率对 LUHPC 拌和物工作性能的影响

Fig. 1 Effect of pre-absorption ratio of lightweight aggregate on LUHPC mixture workability

预吸水率是影响 LUHPC 拌和物工作性能的关键因素.提高轻集料预吸水率有利于改善 LUHPC 拌和物的工作性能,但当预吸水率超过一定值后改善效果有限.轻集料预吸水率明显低于其饱和吸水率时,轻集料在 LUHPC 拌和过程中会吸收胶凝浆体中的水分,导致拌和物水胶比降低,工作性能变差^[23].而当轻集料预吸水率增大后,其吸收胶凝浆体中水分

的能力减弱,尤其是轻集料预吸水率超过 13% 后,轻集料和胶凝浆体中的水分可能基本达到平衡,对 LUHPC 拌和物工作性能的影响变小.

2.1.3 轻集料掺量

基于表 3 基准配合比,以石英砂和预吸水率 13% 的球形陶粒为集料制备 LUHPC,石英砂的颗粒级配与陶粒保持一致.然而,由于陶粒和石英砂表

观密度差别较大,在掺入石英砂时,表3基准配合比中集料的体积分数需保持一致.轻集料掺量(以陶粒

体积分数 φ_c 表示)对 LUHPC 拌和物工作性能的影响见图2.

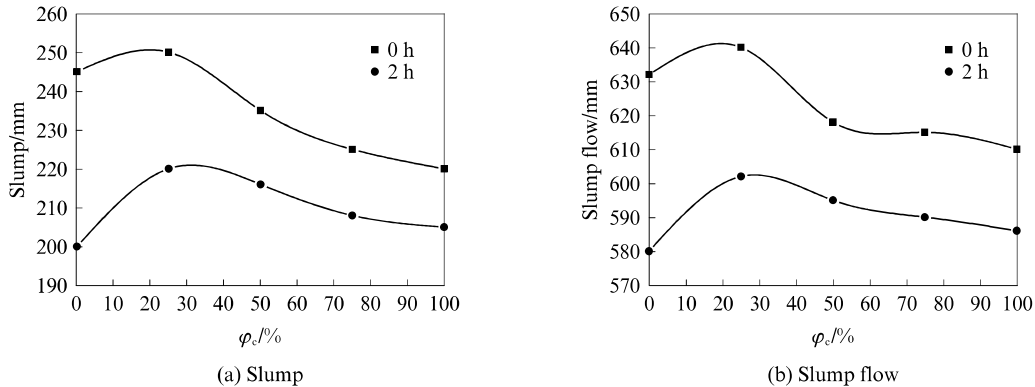


图2 轻集料掺量对 LUHPC 拌和物工作性能的影响

Fig. 2 Effect of volume fraction of lightweight aggregate on LUHPC mixture workability

由图2可见,随着轻集料掺量的增加,LUHPC 拌和物初始、2 h 的坍落度和扩展度均呈现先增大后减小的趋势.由于陶粒呈球形,受到胶凝浆体的黏滞力较小,对 LUHPC 拌和物起到润滑作用,会增大拌和物流动性;随着轻集料掺量的进一步增加,在陶粒自身多孔轻质作用下,将导致拌和物密度下降,自重作用下的流动性减弱.此外,对比 LUHPC 拌和物初始、2 h 的坍落度和扩展度可发现,随着轻集料掺量的增加,LUHPC 拌和物的坍落度和扩展度损失减小,这说明预湿轻集料的掺入减小了 LUHPC 拌和物的流动性损失,但轻集料掺量超过 50% 后的减弱效果有限.

2.2 轻集料对 LUHPC 力学性能的影响

2.2.1 轻集料粒形

轻集料粒形对 LUHPC 力学性能的影响如表5所示.

表5 碎石形和球形陶粒 LUHPC 的力学性能(28 d)
Table 5 Mechanical properties of LUHPC with clastic ceramsite and spherical ceramsite at 28 d

Particle shape	Compressive strength/MPa	Splitting tensile strength/MPa	Elasticity modulus/GPa
Clastic ceramsite	112.3	11.0	54.9
Spherical ceramsite	120.1	12.4	56.2

由表5可见,球形陶粒 LUHPC 的 28 d 抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量均大于碎石形陶粒 LUHPC,说明陶粒粒形对 LUHPC 力学性能有明显影响. Kaplan^[24]发现集料形状指数对混凝土力学性能有较大影响,集料的球形度越大,混凝土力学性能越好;李洋^[25]发现预湿球形陶粒会在高强混凝土中形成“拱壳状”界面区,其特殊的形态能够均匀分

散应力,进而提升混凝土的力学性能.

2.2.2 轻集料预吸水率

轻集料预吸水率对 LUHPC 力学性能的影响如图3所示.

由图3可见,随着陶粒预吸水率的增加,LUHPC 的 28 d 抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量均呈现出先增大后减小的趋势,说明陶粒存在最佳预吸水率. Lo 等^[26]、杨宇婷^[27]研究了轻集料预吸水率对轻集料混凝土力学性能的影响,也发现了相似规律.预湿轻集料在混凝土中具有显著的内养护效应,尤其是在水胶比较低的高性能混凝土中.因此,当轻集料预吸水率增大时,其内养护效果增强,LUHPC 内部的孔隙结构和轻集料-水泥石界面区结构得到改善,LUHPC 力学性能提升.但当轻集料预吸水率过高时,轻集料在 LUHPC 拌和物未终凝时即开始释水,相当于提高了 LUHPC 的总水胶比,导致其力学性能降低.

2.2.3 轻集料掺量

轻集料掺量 φ_c 对 LUHPC 力学性能的影响如图4所示.

由图4可见,随着轻集料掺量的增加,LUHPC 的 28 d 抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量均呈现出先略增后减小的趋势,说明轻集料掺量存在一个最佳值.陶粒自身轻质多孔,强度明显低于石英砂,在 LUHPC 中掺入陶粒等体积替代石英砂后,其强度理论上应降低.然而,掺入的陶粒为球形,替代石英砂后使 LUHPC 颗粒堆积密度提高^[24];且陶粒表面较石英砂更为粗糙,增加了集料与水泥石间的机械啮合作用^[28];此外,陶粒在掺入前预吸了 13% 的水分,其内养护作用也会改善 LUHPC 的孔隙结构

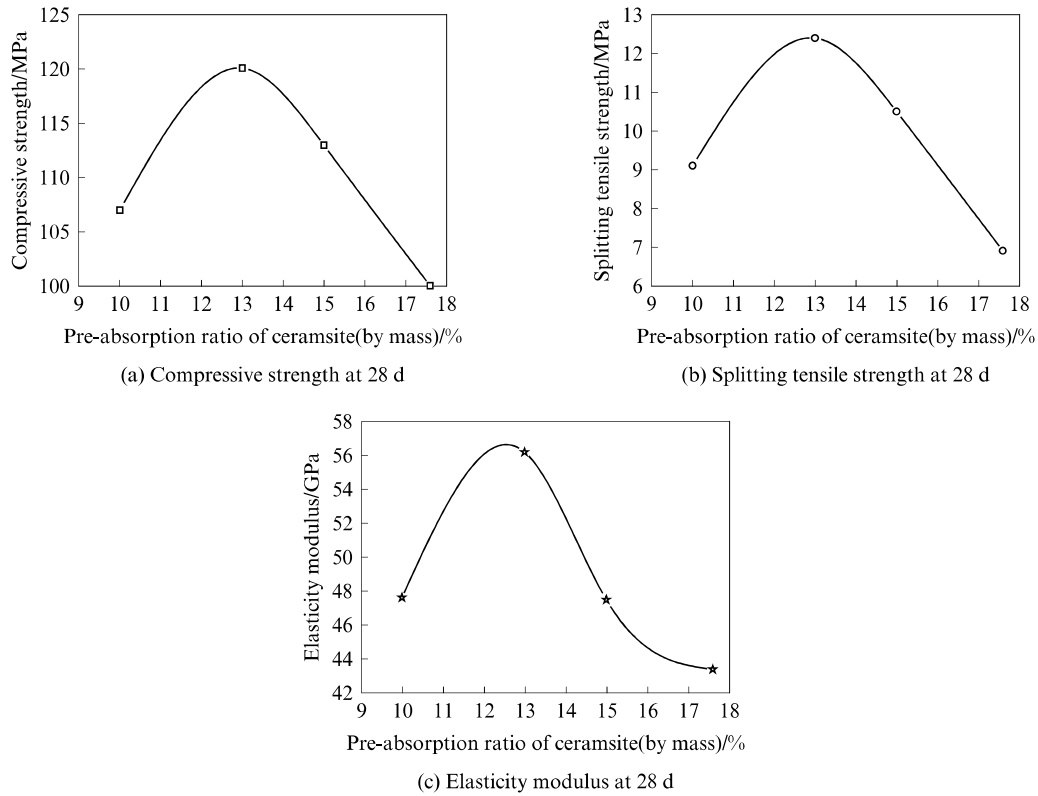


图 3 轻集料预吸水率对 LUHPC 力学性能的影响

Fig. 3 Effect of pre-absorption ratio of lightweight aggregate on mechanical properties of LUHPC

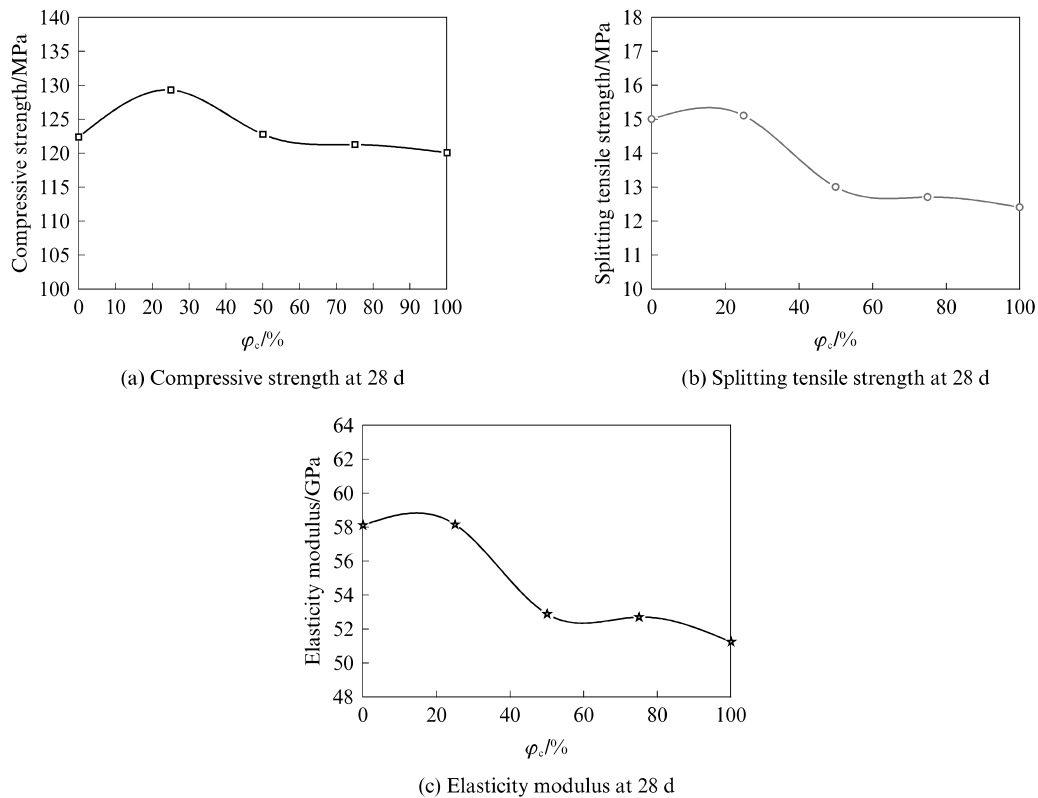


图 4 轻集料掺量对 LUHPC 力学性能的影响

Fig. 4 Effect of volume fraction of lightweight aggregate on mechanical properties of LUHPC

和界面区结构^[25]。以上原因均能改善 LUHPC 的力学性能。因此,轻集料掺量为 25% 时,LUHPC 力学性能略有提升,说明掺入的轻集料正面效应高于负面效应;而轻集料掺量为 50%、75% 和 100% 时,LUHPC 力学性能降低,说明掺入过多轻集料后对其力学性能带来的负面效应更大。但是,轻集料掺量为 100% 时,LUHPC 的 28 d 抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量依然优异,分别达到 120.1 MPa、12.4 MPa 和 56.2 GPa,且其表观密度仅为 1 983 kg/m³,远低于全石英砂 UHPC 的表观密度 2 423 kg/m³。因此,从轻质化 UHPC 的角度来看,球形轻集料 100% 取代石英砂是完全可行的。

2.3 轻集料对 LUHPC 工作性能和力学性能的影响机理

2.3.1 轻集料粒形分析

球形陶粒和碎石形陶粒呈现出完全不同的颗粒形态,球形陶粒具有优异的球形度,而碎石形陶粒为不规则形状。Goktepe 等^[29]、王蕴嘉等^[30]研究表明,颗粒状材料的球形度对其堆积密度有显著影响,孔

隙比随球形度增大而减小,材料的密实程度更高。当 LUHPC 胶凝浆体包裹 2 种粒形的轻集料时,球形陶粒四周更易形成润滑层,产生“滚珠”效应,改善 LUHPC 拌和物工作性能,而碎石形陶粒之间相互摩擦咬合,需要更多的胶凝浆体在颗粒间形成润滑层,导致拌和物工作性能变差。此外,球形陶粒带来的高密实度也会提升硬化 LUHPC 的力学性能。

另一方面,焦双健等^[31]利用 Ansys 软件模拟了单集料混凝土的力学性能,发现随着集料球形度的增大,集料边缘的应力降低,球形集料与四边形集料的最大应力差可达 50%;王蕴嘉等^[30]分析认为卵石堆石料强度主要取决于卵石集料内部接触力的各向异性程度,卵石集料球形度越大,接触力分散越均匀,卵石集料越不容易破碎。这也进一步解释了球形轻集料 LUHPC 力学性能优于碎石形轻集料 LUHPC 的原因。

2.3.2 轻集料表面形貌分析

图 5 为球形陶粒和石英砂颗粒表面形貌 SEM 图。

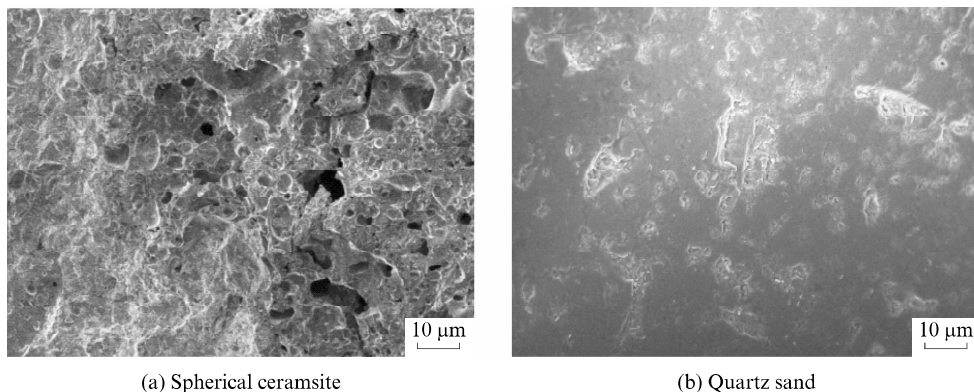


图 5 球形陶粒和石英砂表面形貌 SEM 图
Fig. 5 SEM images of spherical ceramsite and quartz sand

由图 5 可见,球形陶粒表面粗糙、凸凹不平,且有不少微孔,而石英砂表面致密。由二者表面形貌分析可知,陶粒的亲水性明显优于石英砂,陶粒与胶凝浆体在 LUHPC 拌和物中的裹附性和二者在 LUHPC 硬化体中的界面黏结性均明显优于石英砂,进而改善了 LUHPC 的界面。

图 6 为 LUHPC 中球形陶粒-水泥石和石英砂-水泥石界面区的微观形貌图。

由图 6 可见,球形陶粒与水泥石结合密实,二者结合处没有明显的界线,而石英砂与水泥石结合处的界线分明。陶粒表面粗糙多孔,胶凝浆体裹附时会通过表面孔隙渗入其中,混凝土凝结硬化后陶粒-水泥石界面呈嵌锁状结构,进而使陶粒-水泥石黏结更为

紧密^[28]。因此,LUHPC 中的轻集料由于其表面特性而增强了与水泥石的黏结性,进而削弱了轻集料自身强度不足对 LUHPC 力学性能带来的负面影响。

2.3.3 轻集料内部结构分析

由图 6(a)可见,陶粒内部存在大量孔隙,预湿后可以吸收较多的水分,进而能够在 LUHPC 中充分发挥内养护效应,改善其界面区结构。对比图 6(a)、(b)可明显看出,石英砂-水泥石界面区疏松多孔,并有明显的微裂纹存在,而陶粒-水泥石的界面区结构更加密实,与水泥石基体完全融为一体,界面区已经不再是 LUHPC 的薄弱环节。随着 LUHPC 胶凝浆体凝结硬化进程的发展,LUHPC 内部相对湿度迅速下降,为了维持 LUHPC 内部相对湿度

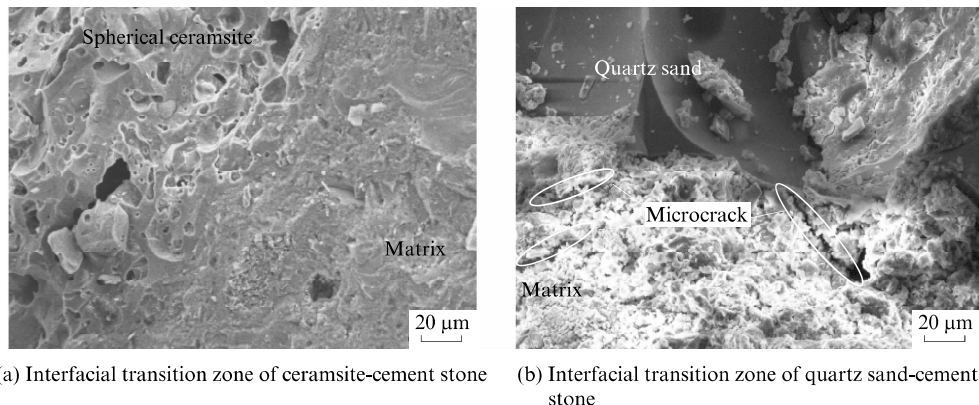


图6 LUHPC中球形陶粒-水泥石和石英砂-水泥石界面区的微观形貌图

Fig. 6 Micro images of interfacial transition zone of ceramsite-cement stone and quartz sand-cement stone in LUHPC

平衡,陶粒会释放预吸收的水分,促进陶粒周围胶凝浆体的水化,进而改善界面区的微观结构和性能.国内外学者的研究表明^[32-34]:在高强混凝土中,作为内养护材料的预湿轻集料因释水而使界面区浆体水化更为充分,使得界面区性能优于水泥石基体,轻集料高强混凝土的性能得以提升.笔者^[35-36]曾利用²⁹Si NMR和显微硬度计定量表征了轻集料-水泥石界面区的水化程度、C-S-H凝胶聚合

度和显微硬度,发现轻集料-水泥石界面区浆体的水化更为充分,C-S-H凝胶平均分子链长增长、聚合度增加,从而提高了界面区的力学性能.

此外,当轻集料为球形时,UHPC中轻集料周围的界面在三维空间呈现为“拱壳状”(见图7(b)),因而可均匀分散外来应力,避免应力对UHPC界面区造成破坏,进而进一步缓解了轻集料自身强度不足对UHPC力学性能带来的负面影响.

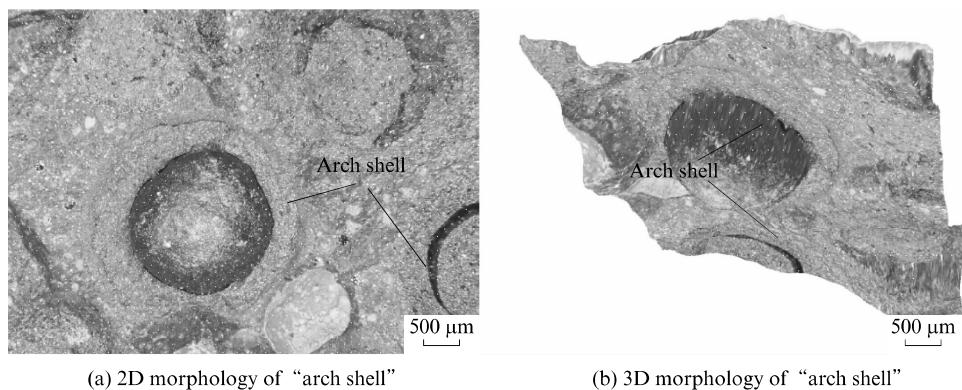


图7 LUHPC中“拱壳状”界面区

Fig. 7 Three-dimensional morphology of “arch shell” in LUHPC

3 结论

(1)提高轻集料的球形度和预吸水率,不仅有益于提升LUHPC拌和物的初始工作性能,而且有益于减小LUHPC拌和物的工作性能损失;增加球形轻集料掺量,LUHPC拌和物的初始工作性能呈现先提升后减弱的趋势,但LUHPC拌和物工作性能的损失持续减小.

(2)球形轻集料LUHPC的力学性能优于碎石形轻集料LUHPC,且随着球形轻集料预吸水率和掺量的增大,LUHPC的力学性能均呈现先增大后

降低的趋势;但即使球形轻集料在LUHPC中的掺量为100%时,其力学性能依然优异,且表观密度远低于全石英砂UHPC.

(3)轻集料粒形和轻集料预吸水率是影响LUHPC性能的关键因素,其主要通过增大颗粒球形度、改善轻集料-水泥石界面黏结性和预湿内养护来提升LUHPC的工作性能和力学性能.

参考文献:

- [1] 贾佳.材料组成对常温养护UHPC浆体力学性能影响的研究[D].长沙:湖南大学,2018.

- JIA Jia. Effect of material composition on the mechanical properties of UHPC paste prepared at room temperature[D]. Changsha: Hunan University, 2018. (in Chinese)
- [2] WANG D, SHI C, WU Z, et al. A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties[J]. Construction & Building Materials, 2015, 96: 368-377.
- [3] SHI C, WU Z, XIAO J, et al. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design[J]. Construction and Building Materials, 2015, 101: 741-751.
- [4] 冯乃谦. 高性能与超高性能混凝土技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 10-11.
- FENG Naiqian. Technology of HPC & UHPC[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015: 10-11. (in Chinese)
- [5] TAM C M, TAM V W Y, NG K M. Assessing drying shrinkage and water permeability of reactive powder concrete produced in Hong Kong[J]. Construction and Building Materials, 2016, 26(1): 79-89.
- [6] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999: 389-392.
- WU Zhongwei, LIAN Huizhen. High performance concrete[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1999: 389-392. (in Chinese)
- [7] 付泽东, 吕林女, 肖静, 等. CSA 膨胀剂对超高性能混凝土性能的影响[J]. 材料科学与工程学报, 2019, 37(4): 559-564, 594.
- FU Zedong, LÜ Linnü, XIAO Jing, et al. Effect of calcium sulphoaluminate expansive admixture on properties of ultra-high performance concrete[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2019, 37(4): 559-564, 594. (in Chinese)
- [8] 黄政宇, 王嘉. 高吸水性树脂对超高性能混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2012, 31(3): 539-544.
- HUANG Zhengyu, WANG Jia. Effects of SAP on the performance of UHPC[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2012, 31(3): 539-544. (in Chinese)
- [9] JUSTS J, WYRZYKOWSKI M, BAJARE D, et al. Internal curing by superabsorbent polymers in ultra-high performance concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2015, 76: 82-90.
- [10] LIU J, SHI C, MA X, et al. An overview on the effect of internal curing on shrinkage of high performance cement-based materials[J]. Construction and Building Materials, 2017, 146: 702-712.
- [11] CWIRZEN A, PENTTALA V, VORNANEN C. Reactive powder based concretes: Mechanical properties, durability and hybrid use with OPC[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38(10): 1217-1226.
- [12] 丁庆军, 胡俊, 刘勇强, 等. 轻质超高性能混凝土的设计与研究[J]. 混凝土, 2019(9): 1-5.
- DING Qingjun, HU Jun, LIU Yongqiang, et al. Research on preparation and performance of lightweight ultra high performance concrete[J]. Concrete, 2019(9): 1-5. (in Chinese)
- [13] 丁庆军, 鄢鹏, 胡曙光, 等. 一种轻质低收缩超高性能混凝土及其制备方法: ZL 201711233051. 9[P]. 2019-11-26.
- DING Qingjun, YAN Peng, HU Shuguang, et al. A lightweight and low-shrinkage ultra-high performance concrete and its preparation method: ZL 201711233051. 9[P]. 2019-11-26. (in Chinese)
- [14] 张高展, 魏琦, 丁庆军, 等. 一种免蒸养轻质超高性能混凝土及其制备方法: ZL 201910355477. 4[P]. 2020-10-02.
- ZHANG Gaozhan, WEI Qi, DING Qingjun, et al. A lightweight and autoclaving-free ultra-high performance concrete and its preparation method: ZL 201910355477. 4[P]. 2020-10-02. (in Chinese)
- [15] JONES M R, ZHENG L, NEWANDS M D. Comparison of particle packing models for proportioning concrete constituents for minimum voids ratio[J]. Materials & Structures, 2002, 35(5): 301-309.
- [16] 邹伟, 尹健, 李益进. 水泥复合胶凝材料体系密实模型研究[J]. 混凝土, 2010(10): 20-24.
- ZOU Wei, YIN Jian, LI Yijin. Study on dense packing model of cementitious materials[J]. Concrete, 2010(10): 20-24. (in Chinese)
- [17] WANG X, WANG K, TAYLOR P, et al. Assessing particle packing based self-consolidating concrete mix design method[J]. Construction & Building Materials, 2014, 70: 439-452.
- [18] 高丹盈, 刘建秀. 钢纤维混凝土基本理论[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994.
- GAO Danying, LIU Jianxiu. Basic theory of steel fiber reinforced concrete[M]. Beijing: Science and Technology Literature Press, 1994. (in Chinese)
- [19] 孙伟, MANDEL J A. 纤维间距对界面层的影响[J]. 硅酸盐学报, 1989, 17(3): 76-81.
- SUN Wei, MANDEL J A. Effects of fiber spacing on interfacial layers[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1989, 17(3): 76-81. (in Chinese)
- [20] 胡翱翔, 梁兴文, 李东阳, 等. 超高性能混凝土配合比设计及其受拉性能[J]. 湖南大学学报, 2018, 291(3): 39-46. (in Chinese)
- HU Aoxiang, LIANG Xingwen, LI Dongyang, et al. Mix design method and uniaxial tensile characteristics of ultra-high performance concrete[J]. Journal of Hunan University, 2018, 291(3): 39-46. (in Chinese)
- [21] 王德辉. 粗骨料对自密实混凝土工作性能的影响[J]. 重庆建筑, 2010, 9(5): 20-23.
- WANG Dehui. Effects of coarse aggregates on self-compacting concrete's working performances[J]. Chongqing Architecture, 2010, 9(5): 20-23. (in Chinese)
- [22] 吴波, 李国华. 骨料粒形的评定方法及对混凝土工作性能的影响[J]. 建筑科学, 2014, 30(11): 93-97.
- WU Bo, LI Guhua. Evaluation method of aggregate grain shape and its impact on the concrete performance[J]. Building Science, 2014, 30(11): 93-97. (in Chinese)
- [23] 檀春丽. 非粘土陶粒及混凝土性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- TAN Chunli. Research on non-clay ceramisite and its concrete

- performance[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)
- [24] KAPLAN M F. Flexural and compressive strength of concrete as affected by the properties of coarse aggregates[J]. Journal of American Concrete Institute, 1959, 30(11):1193.
- [25] 李洋. 轻集料高强混凝土界面区形成与作用机制研究[D]. 合肥:安徽建筑大学, 2016.
- LI Yang. Researches on the formation and action mechanism of interfacial transition zone in light aggregate high strength concrete[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2016. (in Chinese)
- [26] LO T Y, CUI H Z, LI Z G. Influence of aggregate pre-wetting and fly ash on mechanical properties of lightweight concrete[J]. Waste Management, 2004, 24(4):333-338.
- [27] 杨宇婷. 桥面铺装陶砂轻集料混凝土强度性能研究[J]. 北方交通, 2018, 303(7):91-94.
- YANG Yuting. Research on strength performance of haycite for light aggregate concrete of bridge deck pavement[J]. Northern Territory, 2018, 303(7):91-94. (in Chinese)
- [28] 胡曙光, 王发洲, 丁庆军. 轻集料与水泥石的界面结构[J]. 硅酸盐学报, 2005, 33(6):713-717.
- HU Shuguang, WANG Fazhou, DING Qingjun. Interface structure between lightweight aggregate and cement paste[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2005, 33(6):713-717. (in Chinese)
- [29] GOKTEPE A B, SEZER A. Effect of particle shape on density and permeability of sands[J]. Geotechnical Engineering, 2010, 163(6):307-320.
- [30] 王蕴嘉, 宋二祥. 堆石料颗粒形状对堆积密度及强度影响的离散元分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(6):2416-2426.
- WANG Yunjia, SONG Erxiang. Discrete element analysis of the particle shape effect on packing density and strength of rockfills[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(6):2416-2426. (in Chinese)
- [31] 焦双健, 郭勇. 单一骨料形状对混凝土性能影响的数字模拟[J]. 建材世界, 2012(3):12-15.
- JIAO Shuangjian, GUO Yong. Digital simulation of single aggregate shape on concrete performance[J]. Building Materials World, 2012(3):12-15. (in Chinese)
- [32] BURCU A, MEHMET A T. Optimisation of using lightweight aggregates in mitigating autogenous deformation of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1):353-363.
- [33] 韩宇栋, 张君, 王振波. 预吸水轻骨料对高强混凝土早期收缩的影响[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(8):1070-1078.
- HAN Yudong, ZHANG Jun, WANG Zhenbo. Influence of pre-wetted lightweight aggregate on early-age shrinkage of high strength concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2013, 41(8):1070-1078. (in Chinese)
- [34] SEMION Z, KONSTANTIN K, ARNON B. Effect of hybrid curing on cracking potential of high-performance concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2013, 54:36-42.
- [35] 张高展, 魏琦, 丁庆军, 等. 轻集料吸水率对轻集料-水泥石界面区特性的影响[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(5):24-28.
- ZHANG Gaozhan, WEI Qi, DING Qingjun, et al. Influence of water absorption ratio of lightweight aggregate on characteristics of interfacial transition zone between lightweight aggregate and cement[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(5):24-28. (in Chinese)
- [36] DING Q J, XIANG W H, ZHANG G Z, et al. Effect of pre-wetting lightweight aggregates on the mechanical performances and microstructure of cement pastes[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater, 2020, 35(1):140-146.